

CALENDARIO METEOROLÓGICO 1992

Adoldo Marroquín Santoña

LA TELEDETECCIÓN COMO HERRAMIENTA AGROMETEOROLÓGICA

Los factores más importantes y variables de los cambios entre años diferentes en la producción agrícola son las anomalías meteorológicas y climáticas. Fluctuaciones desfavorables de precipitación y/o de temperatura pueden provocar fracasos en los cultivos, retrasos en la siembra y recolección, e incremento de las enfermedades y plagas de insectos. Las heladas, los golpes de calor, los vientos secos pueden desecar las plantas en 24 a 48 horas, y cielos continuamente cubiertos privan a las plantas de la radiación requerida para la fotosíntesis.

La información meteorológica es utilizada junto con otras fuentes de información para el seguimiento de las condiciones de los agro cultivos. Las predicciones de producción de cosecha se basan fundamentalmente en observaciones meteorológicas rutinarias. La exactitud de estas predicciones se reduce cuando las observaciones son escasas, poco fiables o enviadas con demasiado retraso. En muchos países las observaciones meteorológicas son inadecuadas para el seguimiento agrícola, en unos casos porque se mide en condiciones muy diferentes a las de desarrollo de los cultivos, y en otros porque no se miden algunos parámetros que resultan importantes para el seguimiento del cultivo, como pueden ser la irradiación solar, la temperatura de la cubierta vegetal o los índices de vegetación.

Se han desarrollado metodologías para obtener datos cuantitativos del seguimiento agrícola a partir de los datos suministrados por los sensores instalados a bordo de satélites. Estimaciones de la precipitación, insolación y temperatura de superficie desde los datos de satélite no son directamente comparables con los obtenidos por observaciones en tierra debido, entre otros hechos, al promediado espacial que efectúa el satélite. En muchos casos, estas diferencias son ventajosas, ya que una estimación por satélite de las condiciones medias sobre un gran área puede ser más representativa que una simple medida puntual dentro del área. Los modelos agrometeorológicos ordinarios, desarrollados originalmente para trabajar con datos meteorológicos convencionales, pueden ahora utilizar los datos de los satélites, lo que, por una parte, permite la utilización de dichos modelos en zonas en las que se carece de observaciones convencionales, o bien éstas son escasas, y por otra parte, permite dar más generalidad a los modelos al utilizar los datos no de un punto aislado, sino el promedio para un área. No obstante, en este último caso, la generalización se hace a costa de perder precisión en los resultados, por lo que lo conveniente es llegar a soluciones de compromiso combinadas.

La *radiación solar* incidente es la fuente primaria de energía para el crecimiento de la vegetación. El desarrollo de la cosecha y el rendimiento son funciones directas de la fotosíntesis asociada con la cantidad de energía solar acumulada. La radiación solar juega también un papel clave en la evapotranspiración. Las observaciones desde sa-

télites constituyen una excelente fuente de información respecto a la cantidad de radiación solar que alcanza la cubierta vegetal. Los procedimientos utilizados para estimar la radiación solar en una base de tiempo real han sido estadísticos. Estos métodos requieren que coincidan la observación del satélite con la observación en tierra, para obtener los coeficientes de la ecuación de regresión.

Otra variable que está significativamente relacionada con el desarrollo de la cosecha y con sus condiciones es la temperatura del aire. La mayoría de los modelos agrometeorológicos actualmente operativos para seguimiento de cultivos y humedad del suelo incluyen como entradas los datos de las temperaturas máxima y mínima en garita. Se utilizan estos valores por ser los únicos disponibles en la mayoría de las zonas en que se aplican los modelos. Sin embargo, la temperatura «de piel» de la cubierta vegetal puede ser relacionada más directamente con el crecimiento y la evapotranspiración que la temperatura de garita. La diferencia entre ambas es una medida del estrés del cultivo. La temperatura de la superficie radiante está también relacionada con la humedad del suelo y el balance de energía en superficie. La posibilidad de observar directamente la *temperatura de la superficie de la cubierta vegetal* es una de las ventajas de las observaciones satelitarias. Las temperaturas del cultivo y de la superficie son equivalentes cuando el campo de visión del instrumento está totalmente cubierto de vegetación. El suelo desnudo, el agua, y las diferentes comunidades de plantas dentro del campo de visión complican la relación de las temperaturas de la superficie y de la cubierta vegetal.

Puesto que la mayoría de los modelos para cosechas fueron desarrollados para las temperaturas de garita, las temperaturas de superficie derivadas de las observaciones satelitarias han sido utilizadas hasta ahora expresándolas como temperaturas equivalentes de garita.

Las observaciones satelitarias en la ventana del infrarrojo (IR) térmico (10 a 12 μm) son utilizadas para obtener *estimaciones de la temperatura de la cubierta vegetal o del suelo*. Se ha encontrado que el error cuadrático medio en la estimación de las temperaturas de superficie es de 2 a 3 grados para un área normal de cultivos. Los errores provienen fundamentalmente de un conocimiento imperfecto del contenido en vapor de agua, y de las variaciones de la emisividad de la superficie en función de la longitud de onda.

Aunque se ha comprobado que los datos del AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) pueden suministrar estimaciones de la temperatura del suelo con suficiente precisión para la mayoría de las aplicaciones, la puesta a punto de forma operativa del procedimiento encuentra dificultades debidas al problema de la nubosidad. Sobre los océanos, la detección y eliminación de los pixels «contaminados» por la nubosidad es relativamente sencillo de conseguir dada la uniformidad de las superficies marinas y la naturaleza conservativa del campo de temperaturas de la superficie del mar. Sobre tierra, la extrema heterogeneidad de la superficie y los rápidos cambios de las temperaturas superficiales, hacen que el filtrado automático de los datos del AVHRR sea muy difícil. Una solución a este problema sería identificar visualmente y eliminar interactivamente los pixels contaminados por la nubosidad, pero ésta sería una tarea lenta, difícil y costosa.

Las temperaturas de la superficie obtenidas mediante satélite han sido utilizadas para delimitar áreas de heladas y dar avisos de las mismas, así como para efectuar el seguimiento de los efectos de estas heladas en las producciones agrícolas. Los datos IR de los satélites geoestacionarios facilitan la predicción de heladas mediante el

seguimiento de la progresión diurna de la línea de helada. Una predicción acertada de heladas permite a los cultivadores proteger sus cosechas cuando existe una amenaza significativa, evitando gastos innecesarios cuando el riesgo sea insignificante.

El sistema TIROS Operational Vertical Sounder (TOVS) sobre satélite NOAA polares ha sido utilizado para efectuar *estimaciones de las temperaturas de garita*. Estos satélites polares proporcionan la cobertura requerida para el seguimiento de los cultivos. Los pasos orbitales hacia mediodía y medianoche tienen lugar a horas relativamente adecuadas para estimar con suficiente aproximación las temperaturas extremas diarias. Se ha desarrollado un método de regresión lineal simple para estimar la temperatura de garita a partir del sondeo del satélite. Para el cálculo de los coeficientes de regresión se utilizaron series de sondeos del satélite y de temperaturas de garita, coincidentes en espacio y tiempo. Las observaciones horarias de superficie utilizadas incluían las estaciones situadas en un radio de 1,5 grados de latitud respecto a la localización del sondeo, y se extendían a las horas anteriores y posteriores a la del sondeo. Los datos incluían nubosidad, temperatura, punto de rocío y velocidad del viento.

Los modelos de predicción del rendimiento de cosechas requieren *estimaciones de la precipitación* a lo largo de todo el año. La precipitación fuera de la estación de crecimiento determina la humedad del suelo disponible para el cultivo al comienzo de la estación de crecimiento. La cantidad de precipitación y su distribución durante la estación de crecimiento influyen de manera crítica en la fuerza de las plantas y en la productividad de los cultivos.

En muchas regiones del mundo, los observatorios sinópticos meteorológicos están demasiado espaciados para representar adecuadamente la distribución de la precipitación con la resolución necesaria para el seguimiento agrícola. Una importante cantidad de precipitación que tiene lugar entre observatorios no es registrada. Sin embargo, los datos satelitarios disponibles en los canales correspondientes a longitudes de onda en el visible (VIS) y en el infrarrojo (IR), junto a la información procedente de los radares meteorológicos, pueden ayudar a establecer la distribución de precipitación más probable en las áreas en que los datos de las estaciones sinópticas sean escasos. Las observaciones geoestacionarias suministran una cobertura diaria completa de las zonas con posibles precipitaciones más importantes, en particular de las de tipo marcadamente convectivo, que por sus características pueden ser mejor evaluadas. Naturalmente los resultados tienden a ser más exactos al acumular para un cierto período de tiempo y al promediar para un área de tamaño moderado. Por otra parte, la cantidad de precipitación acumulada es generalmente un dato más útil para el seguimiento del crecimiento vegetativo, de manera que los índices satelitarios de precipitación pueden ser muy útiles en el cálculo del rendimiento de una cosecha.

En aquellas zonas cubiertas por la Red de Radares Meteorológicos, son estos instrumentos los que suministran la mejor estimación de la precipitación registrada en su área de cobertura, siempre en base a las oportunas calibraciones efectuadas a partir de las observaciones convencionales.

Conviene recalcar que el factor térmico que condiciona el comportamiento de una cubierta vegetal para el cálculo del funcionamiento de sus diferentes órganos no es directamente la temperatura del aire, sino la temperatura propia de estos órganos, de la que una buena aproximación es la *temperatura media radiativa de la cubierta vegetal*. De hecho, la temperatura del aire no es utilizada más que como sucedáneo ante la dificultad técnica de medir las temperaturas de superficie, pero también y sobre todo ante la extrema variabilidad de éstas a escalas espaciales inferiores.

Como ya hemos señalado, en la práctica la mayor parte de los trabajos agroclimáticos se basa en la temperatura del aire. Algunas tentativas de introducir las temperaturas de superficie, calculadas a partir de modelos simples, en lugar de las temperaturas del aire en los modelos agroclimáticos han puesto en evidencia diferencias significativas en los resultados obtenidos, a pesar de lo cual no se están introduciendo estos cambios de forma operativa en los modelos. Al respecto pueden darse dos explicaciones:

- La utilización de las temperaturas del aire se viene desarrollando desde hace mucho tiempo, y será necesario volver a comenzar, y repetir un gran número de experimentaciones con la nueva herramienta, es decir, reconstruir las diferentes leyes empíricas utilizando las temperaturas de superficie.
- Por otra parte, estas temperaturas de superficie no pueden ser calculadas más que aproximadamente, mediante modelos que introducen una complejidad suplementaria y con frecuencia sin que se disponga de los datos climáticos necesarios.

El aporte de la teledetección responde prácticamente a estos dos frenos, y parece que la solución debe pasar bien por utilizar los modelos antiguos pero obteniendo sus entradas (por ejemplo la temperatura del aire) de los datos suministrados por la teledetección, o bien, lo que parece más conveniente, creando nuevos modelos que se alimenten directamente con estos datos.

Otro campo de interés desde el punto de vista de las aplicaciones de la teledetección es el seguimiento de las temperaturas nocturnas para la *previsión de heladas*, y la cartografía de las zonas afectadas por las mismas. El primer punto está más ligado a la utilización de los satélites geoestacionarios que permiten el seguimiento de la evolución en las zonas de riesgo. En la práctica existen ya experiencias en fase operativa, por ejemplo en los Estados Unidos, donde se ha diseñado un dispositivo de alerta en tiempo real para el área de Florida en base a los datos recibidos desde el GOES. El segundo punto, es decir las cartografías de las zonas afectadas por las heladas, supone una resolución espacial más fina y necesita datos del tipo NOAA, con una resolución espacial de 1,1 km., ciertamente insuficiente para atender al nivel de parcelas, pero muy interesante para la delimitación de zonas afectadas por las heladas a nivel local. La utilización de datos tipo SPOT permitiría llegar a detalles al nivel de parcela citados.

La *predicción de cosechas* es a menudo la meta final que persiguen los trabajos basados en la utilización de los satélites para el seguimiento de la evolución de los cultivos.

Aunque parezca elemental, es necesario recordar que la producción total (en las unidades que convengan, normalmente peso en kg.) a nivel de una unidad administrativa cualquiera (estado, región, provincia o parcela), resulta del producto de dos factores, la superficie cultivada S y el rendimiento unitario R .

$$P(\text{kg.}) = S(\text{ha}) * R(\text{kg/ha})$$

Estos dos valores P y R tienen, evidentemente, una significación muy diferente, y si bien la predicción de cosecha P es, en sí, un objetivo importante de la agrometeorología, también lo es el cálculo del rendimiento R (bajo la dependencia directa de los factores climáticos).

Ahora bien, en el marco del programa LACIE (Large Area Crop Inventory Experiment) de USA (1975-78), es únicamente la superficie S la que ha sido objeto de estimaciones por satélite (Landsat MSS), obteniéndose el rendimiento R mediante modelos agroclimáticos basados en regresiones calculadas a partir de las series históricas. Una paradoja de este programa es haber estimulado la puesta a punto de modelos agrometeorológicos más avanzados, independientes de la teledetección, puesto que se encontró que la utilización de ésta suponía una limitación en la exactitud que se buscaba; así, la estimación por medios satelitarios de S para el trigo de USA en 1977 se separaba en un 1% de los datos de que disponía el Departamento de Agricultura de los USA (el USDA), pero R se subestimaba en un 10%. Esto explica la visión más amplia al plantear el programa AgRISTARS (Agricultural Resources Inventory Survey Trough Aerospace Remote Sensing) en USA (1980-85), y los esfuerzos desarrollados sobre las aportaciones de la teledetección a la estimación de R.

La evaluación de la vegetación por teledetección multispectral se basa en las características propias de la reflectancia de la vegetación y la reflectancia diferencial discernible en las bandas del VIS y del IRP (Infrarrojo Próximo).

La fuerte absorción de la luz por la clorofila en las hojas verdes se traduce en reflectancias de menos del 20% en el intervalo espectral de 0,5 a 0,7 μm (VIS verde y rojo). Estos valores aumentan bruscamente hasta cerca del 60% en el rango 0,7 a 1,3 μm . Estas características de la reflectancia han sido utilizadas frecuentemente, especialmente con datos del Landsat, para clasificar el tipo de cubierta de la tierra, para estimar la superficie de cultivo y para detectar estrés en las plantas.

La evaluación de la vegetación desde un satélite de órbita polar está afectada por la geometría del sistema Sol-blanco-sensor (utilizamos el término «blanco» en el sentido de objetivo de la observación por el instrumento sensor del sistema de teledetección), la cantidad variable y variante de la cubierta nubosa, la frecuencia de la observación, la propia resolución del sistema de teledetección de que se trate, y la contribución de la reflectancia de las superficies desnudas, sin vegetación.

Los satélites polares, tales como NOAA y Landsat, operan a altitudes de 725 a 920 km. Por tanto las estimaciones de las características de la reflectancia de la superficie pueden ser alteradas cuando la energía reflejada atraviesa toda la atmósfera antes de ser detectada por el sensor del satélite. Estos efectos atmosféricos aumentan significativamente en las observaciones fuera del nadir, como es el caso del sensor NOAA AVHRR. El ángulo de barrido ± 56 grados del AVHRR produce espesores ópticos atmosféricos que van desde 1,0 en el nadir a 2,2 en los extremos. Para tratar este problema de los ángulos de visión extremos, algunos investigadores consideran solamente la parte central de la banda observada. Sin embargo, el resultado de esta limitación es reducir la cobertura efectiva para algunas aplicaciones.

El uso del VIS y de la reflectividad en el IR para observar las características de la superficie depende mucho de las condiciones de nubosidad, perdiéndose gran parte de la información. En este sentido, los elementos nubosos más pequeños que la resolución del pixel y las capas finas de cirros son los más difíciles de detectar.

La frecuencia relativa de observación resulta cada vez más importante cuando se la relaciona con el estado de crecimiento de la vegetación. Para el sistema Landsat, la repetición del ciclo es de una vez cada 16 días con un satélite o de 8 días con dos. Los NOAA polares presentan la ventaja clara que supone la observación diaria, y en cuanto a la resolución de los sistemas de teledetección, es decir, el campo de visión

instantánea del instrumento (IFOV: Instantaneous Field of View) va de los 80 m. del Landsat MSS (30 m. para el TM) a los 1,100 m. para el AVHRR. Puesto que la señal recibida por el sensor es el valor integrado para todo el IFOV, las contribuciones de las componentes variables del área de visión deben ser consideradas cuidadosamente en la evaluación de la señal. Evidentemente la alta resolución de las observaciones del Landsat resulta muy ventajosa en algunas de las aplicaciones.

Conviene hacer notar que la información procedente de un sensor de teledetección consiste en series de valores digitales para cada parte del espectro utilizado. Estas señales varían de acuerdo con la presencia o ausencia de vegetación, la densidad de vegetación, la opacidad de la atmósfera, el contenido en humedad de la capa superficial del suelo, etc., suministrando información sobre las condiciones en que se encuentra el área observada; así, una disminución en el IR reflejado puede indicar que la vegetación está bajo estrés; sin embargo, la causa de ello debe ser determinada normalmente por otros medios, por ejemplo, mediante observaciones directas de campo. En el futuro es previsible que se llegue a disponer de un catálogo de anomalías en los cultivos junto con las condiciones de diagnóstico en base a criterios multispectrales.

Como consecuencia de las observaciones diarias del AVHRR, el *análisis de las series temporales de condiciones de la vegetación*, local, regional y globalmente, tienen un potencial significativo. Se generan gráficos semanales de valores de índices de vegetación con fines de evaluación. Estos gráficos de valores semanales comparan la variación de los índices de vegetación de la estación de crecimiento en curso con los correspondientes a los años anteriores para regiones agroclimáticas específicas para todas las áreas agrícolas del globo. Estas comparaciones pueden revelar tendencias significativas en la reflectancia de la vegetación a pesar de las condiciones variables de la atmósfera. Sin embargo, los índices en las series temporales planteadas no están libres de errores, dado que otros factores ajenos a la vegetación pueden influir en los valores. La experiencia con los *índices de vegetación* derivados de observaciones de satélites que están relacionados con la cantidad y condición de la vegetación observada, y el conocimiento de la agroclimatología de cada región son fundamentales para la correcta interpretación y evaluación de estos productos.

Si las variaciones espaciales o las evoluciones temporales de las reflectancias en una u otra de las bandas espectrales permiten efectuar observaciones interesantes, resulta claro que la combinación de diferentes bandas espectrales puede aportar informaciones cuantitativas susceptibles de aplicaciones automatizadas.

Dentro de un plan operacional, será necesario proseguir los trabajos sobre los problemas relacionados con:

- La presencia de nubes, sobre todo bajo la óptica de la adaptación cada vez más estrecha de las fechas de los datos con relación al calendario fenológico.
- La transmisión atmosférica, cuyos efectos sobre la clasificación son netamente más señalados en el caso de superficies heterogéneas, lo que conducirá a introducir parámetros de dimensiones de campos en los modelos, y el ángulo de visión que conlleva el riesgo de tener los mayores efectos para una resolución espectral mejorada.
- Los efectos espectrales del suelo sobre la discriminación de la vegetación.

Parece evidente que la teledetección es ya una herramienta en el campo de la agro-meteorología, a pesar de todas las limitaciones que suponen los problemas específi-

cos aún no resueltos, presentando unas posibilidades que hacen pensar que esa herramienta, como todas, resultará tanto más importante y eficaz cuanto mejor sepamos utilizarla.

Adolfo Marroquín Santoña

Meteorólogo
C.M.Z. de Badajoz